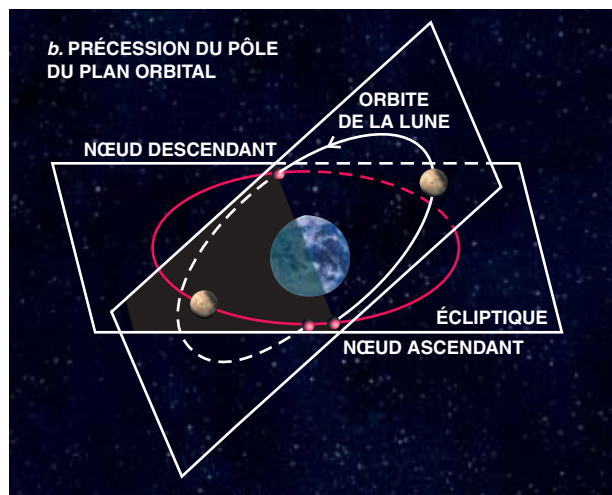
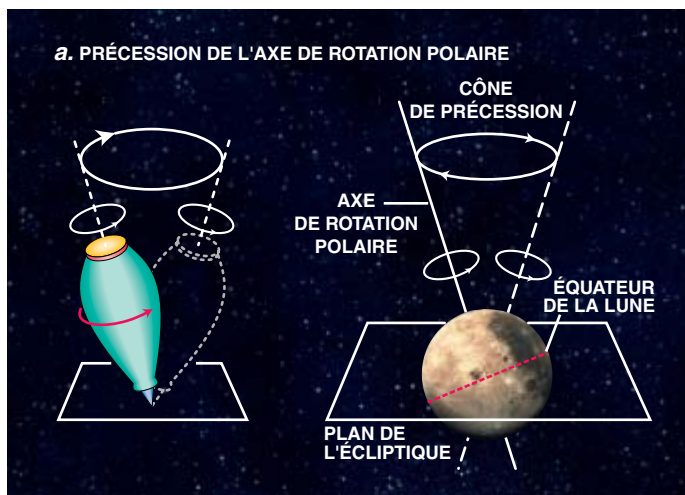




4. LE MOUVEMENT DE PRÉCESSION ressemble à celui d'une toupie. La Lune a deux mouvements de précession. Le premier concerne son axe de rotation polaire : il tourne autour d'une position moyenne et décrit un cône en 18,6 ans (a). Le second concerne le pôle de son plan orbital (l'axe perpendiculaire à son plan orbital), qui décrit lui aussi un cône (b). L'orbite de la Lune croise le plan de

l'écliptique en deux points, nommés nœud ascendant et nœud descendant. À cause de cette seconde précession, à chaque fois que la Lune croise le plan de l'écliptique, les nœuds sont un peu décalés des nœuds précédents. Les nœuds retrouvent leur position initiale au bout de 18,6 ans. Les deux précessions sont synchronisées selon la période de 18,6 ans.

Dans le modèle, on retrouve un ensemble de termes identiques aux termes newtoniens et un autre ensemble de termes proportionnels au facteur $1/c^2$, où c est la vitesse de la lumière. Nous nommons cette seconde catégorie de termes, les contributions «strictement» relativistes. Les libérations relativistes correspondent à ces contributions dans le mouvement de rotation de la Lune. L'amplitude de ces libérations atteint une milliseconde de degré avec des périodes de 18,6 ans et 80,1 ans. Les libérations relativistes constituent une troisième famille de libérations à part entière. Elles atteignent le seuil de la précision actuelle des observations.

Dans le cas de la rotation de la Terre, les contributions «strictement» relativistes sont près de deux ordres de grandeur inférieures à la précision des observations sur la rotation de la Terre. La Lune se présente donc comme une meilleure candidate que la Terre pour la vérification de ce type de termes relativistes prévus par les développements théoriques des équations d'Einstein. Par ailleurs, elle pourrait aussi servir de détecteur ou de «témoin» de phénomènes autres, telles les interactions du Système solaire, comme nous venons de le montrer sur un cas : la figure dynamique du Soleil.

Le Soleil est très légèrement aplati à ses pôles, mais la valeur de cet aplatissement, qui se situe entre 10^{-8} et 10^{-5} , n'est pas connue avec précision. Or, l'aplatissement solaire a un effet

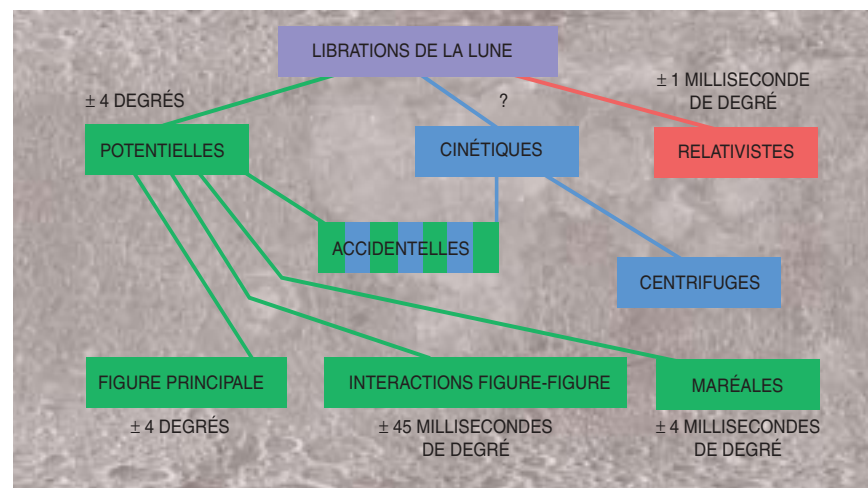
gravitationnel sur les libérations lunaires. Nous avons calculé les libérations produites par cet effet et déterminé celles qui sont compatibles avec les libérations connues. Nous avons ainsi réduit en retour la fourchette des valeurs possibles en estimant la borne supérieure à 3×10^{-6} .

Le noyau de la Lune est-il liquide?

Nous utilisons aussi notre modèle pour étudier les libérations créées par le cœur de notre satellite. Le noyau de la Lune reste très mystérieux : on ne connaît ni sa taille ni sa nature. Des sismographes ont été posés sur le sol lunaire et mesurent toutes les secousses. Plusieurs milliers de séismes profonds se produisent

chaque année. Cependant, le signal est très faible et se propage lentement. Les tremblements du sol lunaire semblent contrôlés par les déformations de la croûte, liées aux marées. Malgré ces mesures, on ignore si le noyau de la Lune est solide, liquide ou visqueux. Le noyau serait probablement petit. S'il est métallique, son rayon est inférieur ou égal à 600 kilomètres. S'il est liquide, son rayon est inférieur ou égal à 400 kilomètres.

Quoi qu'il en soit, le rapport de la masse du noyau à la masse totale de la Lune est faible, moins de 15 pour cent (pour un rayon de 400 kilomètres), alors qu'il atteint 50 pour cent pour Mercure et 33 pour cent pour la Terre. La description du noyau de la Lune est importante, car les astronomes remontent aux mécanismes de formation des



5. TABLEAU RÉCAPITULATIF des familles et sous-familles de libérations, et de leurs amplitudes maximales.

planètes notamment grâce à la connaissance des noyaux planétaires.

Comment utiliser les descriptions hyperfines de la rotation de la Lune pour résoudre l'énigme du noyau ? De la même façon qu'on peut identifier un œuf cru d'un œuf dur sans les casser, seulement en les faisant tourner sur eux-mêmes : les deux œufs ne pré-

sentent pas un mouvement de rotation identique ! L'œuf dur a une rotation régulière qui diminue progressivement, tandis que la rotation de l'œuf cru présente des oscillations, à cause du jaune qui bouge à l'intérieur.

Nous avons construit une représentation simple de noyau lunaire dans notre modèle global des librations de

la Lune. Nous lui avons attribué différentes compositions et tailles. Pour chacun des noyaux, nous avons calculé les librations lunaires et sélectionné celles qui sont compatibles avec les observations. Certaines des librations calculées ont une fréquence de 2,9 ans, c'est-à-dire une des fréquences de résonance du système. Seul un noyau très

Les librations de la Lune décrites par trois angles

La description de la rotation complète de la Lune s'obtient par la résolution des équations générales de la rotation d'un corps solide. La solution de ces équations, paramétrée par des angles dits d'Euler (à gauche, ci-dessous), donne l'évolution temporelle de la rotation de la Lune (sa rotation moyenne et ses librations) (à droite, ci-dessous).

L'évolution de ces angles exprime la rotation d'un repère $Oxyz$, lié à la Lune, par rapport à un repère de référence $OXYZ$ non-tournant, centré sur le centre de masse de la Lune. Le plan de référence OXY est ici un équateur terrestre fixe, défini comme plan de référence à une date donnée (le plan «J2000»).

La rotation de la Lune autour de son axe polaire Oz est représentée par l'angle φ (cette rotation élémentaire est nommée «rotation propre»). L'angle θ représente les variations de l'inclinaison de l'axe polaire lunaire par rapport à l'axe de référence OZ (θ est l'angle dit de «nutation»). Enfin, l'angle ψ représente la «précession» de l'axe polaire lunaire Oz autour de l'axe de référence OZ . La Lune tourne sur elle-même en 27,3 jours, mais l'angle φ a été tracé sans cette rotation uniforme et rapide, afin que l'on distingue les oscillations périodiques.

Les trois angles oscillent avec une période majeure de 18,6 ans, conduite par la précession des nœuds de la Lune. Ces larges oscillations, de plusieurs degrés d'amplitude, rendent compte des librations apparentes optiques (celles «vues de la Terre», c'est-à-dire liées à la configuration relative de la Lune par rapport à la Terre). L'angle θ varie régulièrement entre 22 et 25 degrés

(l'équateur terrestre J2000 est incliné de 23,5 degrés par rapport au plan de l'écliptique et l'axe polaire lunaire oscille autour d'un angle de 1,5 degré par rapport au pôle du plan de l'écliptique). Cet angle θ représente les librations apparentes optiques en latitude (à l'exception de celles de période égale à 27,3 jours, non représentées ici). La modulation en ψ de 18,6 ans rend compte des librations apparentes optiques en longitude (toujours sans celles de période égale au mois lunaire). Dans la présente «expérience numérique», tout ce passe comme si l'observateur était situé au centre de la Terre. Les librations dites diurnes ne sont donc pas représentées.

De plus petites oscillations se superposent aux trois grandes modulations de période 18,6 ans : elles sont visibles dans l'épaisseur du trait. Il s'agit de toutes les autres librations, dont les amplitudes sont plus faibles. Leurs amplitudes sont au maximum de l'ordre de 500 secondes de degré en ψ et φ , et 250 secondes de degré en θ . Une modulation intermédiaire apparaît en φ , due à l'action gravitationnelle directe du Soleil sur la rotation de la Lune : sa période est de un an. Les librations furent nommées «physiques», et elles traduisent les déviations au mouvement moyen décrit par les lois empiriques de Cassini. Les deux types de librations («apparentes» et «physiques») ne sont ni plus ni moins physiques, et tout aussi réelles, l'une que l'autre. Dans les équations de la rotation de la Lune, les librations apparentes et la plus grande des librations «physiques» correspondent au même terme perturbatif, c'est-à-dire à l'action gravitationnelle directe de la Terre sur la rotation de la Lune.

